第46卷 第6期
2023年6月
干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY
Vol. 46 No. 6
Jun. 2023

疏勒河流域农业水土资源时空匹配特征分析

杨 静[1]， 周冬梅[1]， 马 静[1]， 朱小燕[1]， 金银丽[1]，
周 凡[2]， 张 军[1,3]

（1. 甘肃农业大学资源与环境学院，甘肃 兰州 730070；2. 甘肃农业大学管理学院，甘肃 兰州 730070；
3. 甘肃省节水农业工程技术研究中心，甘肃 兰州 730070）

摘 要：水土资源是农业生产最重要的基础性资源，其空间的合理有效配置有利于资源的充分利用和区域可持续发展。以疏勒河流域为研究对象，基于水足迹理论核算流域农业生产水足迹变化规律，采用基尼系数和空间错配模型定量评估研究区2000—2020年农业水土资源的时空匹配动态趋势及其敏感性。结果表明：(1) 2000—2020年疏勒河流域农业作物生产水足迹和作物种植面积总体呈波动下降趋势，作物生产水足迹峰值出现在2007、2018年，作物种植面积峰值出现在2009、2018年；流域年均蓝水足迹贡献率达90.9%，且与绿水足迹呈互补关系，表明蓝水是疏勒河流域农业用水的主要来源。(2) 农业水土资源的空间匹配程度逐渐提高，总体处于较匹配的状态；蓝、绿水足迹与作物种植面积的空间不匹配程度逐渐得到改善，空间分布中均呈现出中部高、四周低的特点。(3) 作物种植面积对作物生产水足迹变化呈中、高度敏感性的地区数量不断增加趋势。

关 键 词：水足迹；水土匹配；敏感性分析；疏勒河流域

文章编号：1000－6060(2023)06－0982－11(0982～0992)

水资源是人类社会发展不可或缺的重要自然资源，也是区域人类和自然系统健康绿色可持续发展的重要物质资源基础，其在维护环境及社会功能方面的重要作用是不可替代的。研究发现，在全球平均每年消耗100×10^{8} m^3的淡水资源用以维持人类进行社会生产和生活，作为最大的淡水资源使用者，农业用水量占全球总用水量的92%及以上[1]。随着气候变化对水资源分布和作物生长周期的影响，如何在确保粮食安全的基础上实现农业用水的节约已成为21世纪全球需要解决的重大问题。特别是在水资源严重缺乏、农业高度依赖灌溉的国家和地区[2-3]，利用灌溉水弥补土壤水分不足，以期提高农业生产力。但随着社会经济的快速发展、人口增长和城市化进程的加快，人类活动规模和强度不断增加，社会经济系统需水量持续增加，导致出现了如农业水资源过度利用、农田转非农等问题，使得全球范围内的水资源压力越来越大[4]。因此，未来几十年人类面临的最大挑战之一将是持续增加全球作物产量的同时减少对全球社会和生态系统的负面影响[5-6]。

生态环境的退化，引起了人们对内陆干旱绿洲水土资源冲突的广泛讨论，研究发现有效水资源与耕地资源的短缺和错配是农业现代化进程中长期的、根本性的制约因素[7]。迄今为止，国内外针对干旱区农业水土资源匹配的研究主要集中在水土资源的时空分布特征和匹配上，且多基于区域和行政单元进行。诸多研究发现，在全球粮食安全面临严峻挑战的背景下所有区域都不可能通过粮食进口

收稿日期：2022-09-20； **修订日期：**2022-11-28
基金项目：甘肃省高等学校创新基金(2021A-061)；甘肃省自然科学基金(21JR7RA811)；甘肃省林业和草原科技创新计划(LCKJCX202205)；甘肃省社科规划项目(2022YB069)资助
作者简介：杨静(1993-)，女，硕士研究生，主要从事农业水土资源匹配等方面的研究. E-mail: 1664045866@qq.com
通讯作者：张军(1977-)，男，教授，主要从事生态系统服务与水土资源利用等方面的研究. E-mail: zhangjun@gsau.edu.cn

来解决缺水问题，特别是在农业生产对经济增长起着重要作用，农村居民收入严重依赖农业的地区[8-9]。而针对干旱区的研究则多利用统计年鉴中获得的水土资源参数，通过绘制洛伦兹曲线、建立基尼系数模型等测算区域总体的时空分布特征和水土资源匹配的整体一致性特征，但只能片面地反映水土资源的相对时空比，不能直接表达农业作物实际水土资源的时空一致性分布。

水足迹理论的引入则为研究提供了新的思路，1998年Allan提出虚拟水概念，在此基础上，为了更好地理解自然资本在各种人类活动消耗水量方面的分配，2003年Chapagain等[10]基于虚拟水和生态足迹理论提出了水足迹（Water footprint，WF）的概念用以分析解决水资源供给不足与人口增长导致的诸多问题[1]。水足迹为评估淡水资源利用提供了一种全面有效的方法，尤其是在农业生产中。根据水足迹的含义和作用，包含3个组成部分：蓝水足迹（Blue water footprint，WF_{blue}）、绿水足迹（Green water footprint，WF_{green}）和灰水足迹（Grey water footprint，WF_{grey}）[11]。具体而言，全球农业生产中活跃的大部分水实际上是WF_{green}[12]，农业绿水资源则是指可被作物吸收且不会流失的有效降水量[13]；而蓝水资源是指从河流、湖泊或地下蓄水层抽水用于农业灌溉的水，即灌溉蓝水。水足迹反映了气候因素（供水）和人为因素（需水）之间的空间分布的潜在联系，及其时空序列演变趋势[14]。目前，在全球或国家尺度[15-16]到区域[17]和流域[18]等不同尺度上进行了农业水足迹方面的研究，水资源作为区域农业土地利用的瓶颈因素，其数量多寡严重影响土地利用结构的合理程度[19]。因此，研究农业水土资源的时空变化及其匹配特征对于优化水土资源的合理配置、提高水土资源利用效率、维持农业生产能力具有极其重要的现实意义[20]。

疏勒河流域地处西北内陆河干旱区，是中国西北地区重要的生产基地，同时也是"一带一路"的关键节点。在西部大开发战略背景下，特别是近20 a来，受高强度农业开发的影响，耕地面积增加了52.73%，其中约70.22%的新增耕地由草地和荒地转化而来。此外，灌溉水长期占总需水量的70%以上。大规模占用农业水土资源造成的水土流失和污染，导致疏勒河流域环境质量下降。水资源的合理利用与否直接影响着农田的生产效率和利用方式，而农田的开垦程度制约着水资源的开发利用。因此分析农业水土资源的时空变化，研究二者间的匹配特征及变化机理，对于优化农业水土资源配置、维持农业生产能力、协调西部生态脆弱地区农业发展与生态文明建设之间的相互关系有着极为重要的现实意义。

本文深入研究2000—2020年疏勒河流域农业水土资源的时空格局演变及其驱动机制。首先通过构建疏勒河流域区域作物种植面积和作物生产水足迹的空间错配指数和基尼系数模型，分析解释干旱区作物种植面积与作物生产水足迹的时空变化趋势以及作物生产水足迹年际变化对区域作物种植面积的影响，进而总结疏勒河流域水土资源的拟解决问题。旨在通过分析区域作物生产水足迹变化对农田资源的影响从而因地制宜制定农业水土资源的高效利用建议，以提高蓝绿水资源的利用效率，确保区域农田规模，同时为缓解该地区用水矛盾、干旱区农业的管理以及未来农业发展政策制定出新的可行性建议。

1　研究区概况

疏勒河流域（图1）地理位置介于38°00′~42°48′N，92°11′~98°30′E之间，流域面积约20197 hm²，地势南高北低，是甘肃省重要的农业灌溉生产基地，是

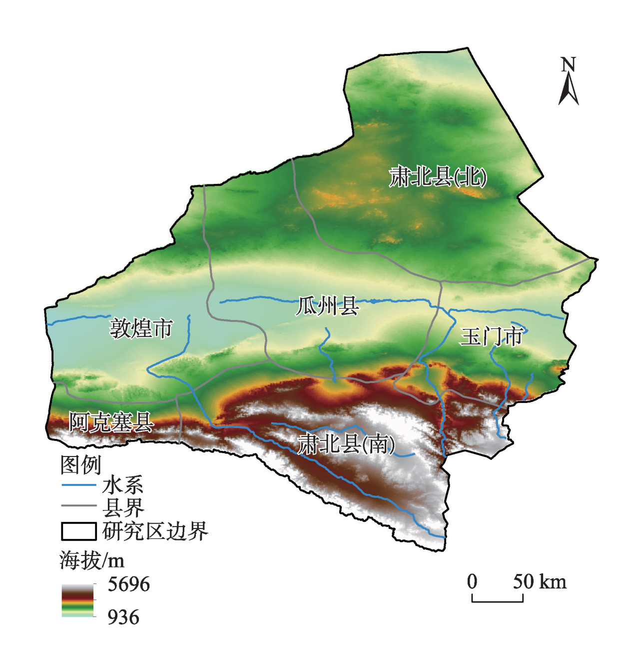


图1　研究区示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the study area

"一带一路"核心区域。疏勒河流域属于典型的干旱荒漠性气候区,降水稀少、蒸发量大、太阳辐射强,年均降水量低于60 mm,年蒸发量最高可达3000 mm以上。

疏勒河流域发源于祁连山脉西段陶赖南山与疏勒南山之间的疏勒脑,地处蒙新高原、青藏高原之间,地势南高北低并由东南向北倾斜。南部的肃北县及阿克塞县为高海拔山区,发育典型的大陆性冰川并分布多年冻土,是疏勒河流域重要的产流区和水源涵养区域;中部走廊地区河流灌溉形成互不相连的绿洲,分布在玉门市、瓜州县及敦煌市等地区,地势低平,干旱少雨;北部为砂质或砂砾质戈壁和低山丘陵,植被稀疏,荒漠分布广泛,土地沙化严重,自然环境十分脆弱。近年来,由于气候变化以及人类的活动导致该地区出现耗水量增加,地下水位下降等严重的环境问题进而形成天然植被退化、绿洲萎缩等生态环境问题。若不加以控制,该流域绿色生态可持续发展将受到严重威胁[21]。

2 数据与方法

2.1 数据来源

研究数据来源为:(1) 2000—2020年的气象站点气象数据(气温、降水、相对湿度、平均风速及日照时数)来源于国家气象科学数据中心(http://data.cma.cn)。(2) 作物产量、种植面积、农业生产数据等来源于《甘肃统计年鉴》和《甘肃发展年鉴》。(3) 作物生育阶段、种植时间等通过对当地农户调研及结合部分文献[22-23]获得。(4) 农业用水量、降水量等则取自《甘肃省水资源公报》。(5) 土地利用数据(2000—2020年)来源于Globe Land 30全球地理信息公共产品(http://www.globallandcover.com),其空间分辨率为30 m。利用ENVI 5.3对遥感影像进行辐射定标、大气校正、几何校正等预处理,经过影像增强处理,组合最优波段,结合野外调查,并根据疏勒河流域边界对影像进行拼接及裁剪,得到疏勒河流域土地利用现状图,且精度在80%以上。

2.2 研究方法

2.2.1 作物生产的水足迹 综合农业相关年鉴数据发现,疏勒河流域小麦、玉米、棉花、马铃薯的多年平均种植比例占75%以上,因此研究将这4种作物生产水足迹(WF_{pro})总和作为疏勒河流域的WF_{pro}。本研究使用彭曼公式[24]准确计算疏勒河流域不同地区和气候条件下的蒸散量(ET_c),有效降雨量(P_{eff})使用联合国粮食及农业组织开发的CROPWAT模型计算。研究将WF_{pro}分为WF_{blue}和WF_{green},计算公式如下:

$$WF_{pro} = \sum_{i=1}^{n} WF_{(blue,green)} \tag{1}$$

$$WF_{blue} = 10 \times \sum_{d=1}^{m} \max\left(0, ET_c - P_{eff}\right) \times P_i / \gamma \tag{2}$$

$$WF_{green} = 10 \times \sum_{d=1}^{m} \min\left(ET_c, P_{eff}\right) \times P_i / \gamma \tag{3}$$

式中:WF_{pro}为流域内第i个地区的作物生产水足迹(m^3);n为流域内的地区数量(n=5);i为流域内地区的次序号(依次为瓜州县、肃北县、阿克塞县、玉门市、敦煌市);$WF_{(blue,green)}$为第i个地区作物生产的蓝、绿水足迹之和(m^3);WF_{blue}为流域内第i个地区的作物生产蓝水足迹(m^3);WF_{green}为流域内第i个地区的作物生产绿水足迹(m^3);常量因子10是水深(mm)到单位陆地面积水量($m^3 \cdot hm^{-2}$)的换算系数;m为作物的生育期(d);ET_c为疏勒河流域农作物在生长期间的实际蒸散量(mm);P_{eff}为有效降雨量(mm);P_i为作物的总产量(t);γ为单位面积作物产量($t \cdot hm^{-2}$)。

2.2.2 水足迹理论与水土匹配 基尼系数由经济学家Gini Corrado提出并应用于研究收入差异问题[25],自然资源也存在相似的地区分异,因而可借鉴利用基尼系数评价区域水土资源时空匹配特征。本研究利用基尼系数模型研究作物水足迹与作物种植面积之间的匹配关系,基尼系数模型公式如下:

$$G = 1 - 2\int_0^1 f(x)dx \tag{4}$$

式中:G为基尼系数,可以通过计算洛伦兹曲线图中的直线$y=x$,$x=f(x)$以及$y=f(x)$合围的区域面积,除以直线$y=x$与x轴围成的区域面积进行计算。各地区作物生产水足迹与耕地面积空间匹配的洛伦兹曲线图中,x轴为年际作物生产水足迹的累积占比量,y轴为年际作物种植面积的累积占比量。基尼系数范围介于0~1之间;其中,基尼系数值越接近1,区域作物生产水足迹与作物种植面积之间的匹配程度越高。

2.2.3 空间错配模型 根据学者Gobillon等[26]的相关研究,空间错配指数(Spatial mismatch index,SMI)在本研究中被用来描述空间水资源和土地资源之

间的不平衡，计算公式如下：

$$\mathrm{SMI}\left(\mathrm{WF_{pro}}-\mathrm{OF_a}\right)_i=\left(\frac{\mathrm{WF}_i}{\sum_{i=1}^{n}\mathrm{WF}_i}-\frac{\mathrm{OF}_i}{\sum_{i=1}^{n}\mathrm{OF}_i}\right)\times 100 \quad (5)$$

$$\sum\mathrm{SMI}\left(\mathrm{WF_{pro}}-\mathrm{OF_a}\right)=\sum_{i=1}^{n}\left|\mathrm{SMI}\left(\mathrm{WF_{pro}}-\mathrm{OF_a}\right)_i\right| \quad (6)$$

式中：$\mathrm{SMI(WF_{pro}-OF_a)}$为在流域内第$i$个地区的作物生产水足迹与作物种植面积之间的空间错配指数(i=5)；$\mathrm{OF_a}$为作物种植面积($\mathrm{hm^2}$)；WF_i为流域内第i个地区的$\mathrm{WF_{pro}}$($\mathrm{m^3}$)；OF_i为流域内第i个地区的$\mathrm{OF_a}$($\mathrm{hm^2}$)；$\sum\mathrm{SMI(WF_{pro}-OF_a)}$为流域空间错配的总级别。其中，空间错配指数越低，$\mathrm{OF_a}$在第$i$个地区内就越能得到广泛利用。研究选择Jenks自然保护区分类设定结果的标准值[27]以期判断作物生产水足迹与作物种植面积之间的空间关系匹配程度。SMI越高则作物生产水足迹与作物种植面积之间的空间一致性水平越低。

2.2.4 敏感性指数分析 运用敏感性指数(Sensitivity index，SI)定量分析研究区$\mathrm{OF_a}$对$\mathrm{WF_{pro}}$的敏感性，旨在解释$\mathrm{WF_{pro}}$变化引起的$\mathrm{OF_a}$变化，进而研究两者间的潜在影响，计算公式如下：

$$\mathrm{SI}_i=\left|\frac{(\mathrm{OF_{t2}}-\mathrm{OF_{t1}})/\mathrm{OF_{t1}}}{(\mathrm{WF_{t2}}-\mathrm{WF_{t1}})/\mathrm{WF_{t1}}}\right| \quad (7)$$

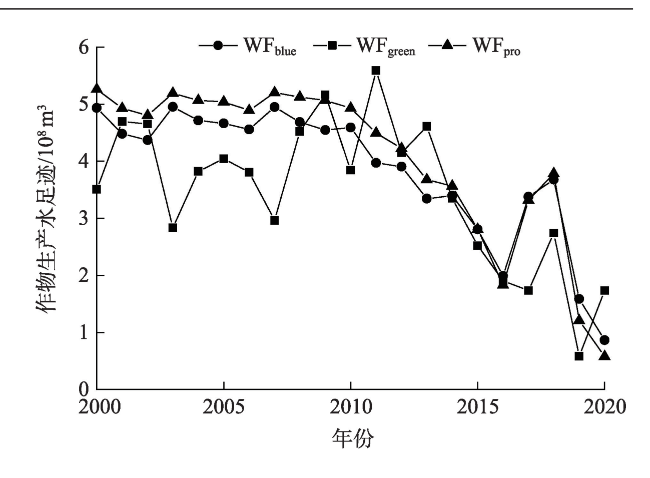
式中：SI_i为流域内第i个地区作物种植面积对作物生产水足迹的敏感性指数；$\mathrm{OF_{t1}}$和$\mathrm{OF_{t2}}$分别为研究期开始和结束时的作物种植面积($\mathrm{hm^2}$)；而$\mathrm{WF_{t1}}$和$\mathrm{WF_{t2}}$分别为研究期开始和结束时的作物生产水足迹($\mathrm{m^3}$)。SI值越高，表明作物种植面积对作物生产水足迹变化的敏感性越高，意味着作物种植面积可能会被作物生产水足迹的细微变化所改变。

3 结果与分析

3.1 作物生产水足迹与区域作物种植面积的时空演变特征分析

疏勒河流域$\mathrm{WF_{pro}}$的年际变化波动趋势基本保持一致，呈波动式下降趋势，且$\mathrm{WF_{blue}}$是该流域农业用水足迹的主要组成部分(图2)。

从时序变化来看，研究期间$\mathrm{WF_{pro}}$减少80.66%，$\mathrm{WF_{pro}}$累年平均值为$4.21\times10^8\ \mathrm{m^3}$；$\mathrm{OF_a}$从2000年的$4.06\times10^4\ \mathrm{hm^2}$到2020年$1.60\times10^4\ \mathrm{hm^2}$，$\mathrm{OF_a}$减少了60.61%，$\mathrm{WF_{blue}}$与$\mathrm{WF_{pro}}$变化呈一致下降趋势。从研



注：$\mathrm{WF_{blue}}$为作物生产蓝水足迹；$\mathrm{WF_{green}}$为作物生产绿水足迹；$\mathrm{WF_{pro}}$为作物生产水足迹。下同。

图2 疏勒河流域作物生产水足迹变化趋势

Fig. 2 Variation trend of crop production water footprint in the Shule River Basin

究区不同作物水足迹的年际变化来看(图3)，玉米变化趋势明显区别于其他作物，呈波动式增长，这是由于玉米作为当地的重要粮食作物，区域节水灌溉技术改进以及该作物种植比例增加导致的，且小麦、棉花和马铃薯的种植比例均有所减少。研究区作物$\mathrm{WF_{pro}}$波动年份主要集中在2010年后，主要由于$\mathrm{OF_a}$减少和降水量提高导致$\mathrm{WF_{pro}}$的下降速度加快，且在2018—2020年尤其明显。

从空间动态分布来看，各地区$\mathrm{WF_{pro}}$年际变化均呈相似的波动式下降趋势(图4)，将流域各地区$\mathrm{WF_{pro}}$按年平均值降序排列依次为敦煌市、瓜州县、玉门市、肃北县和阿克塞县，其中敦煌市是阿克塞县的212倍。

研究期间除肃北县和阿克塞县地区外，其他地区的$\mathrm{WF_{pro}}$均表现出一致下降趋势。其中，敦煌市对流域$\mathrm{WF_{blue}}$的组成贡献最大，为41.52%。其次瓜州县和玉门市，分别为34.49%和18.62%。与$\mathrm{WF_{blue}}$相比，$\mathrm{WF_{green}}$的年际变化在每个地区的增长趋势相对较轻微。流域$\mathrm{WF_{pro}}$主要分布于流域中部，呈中部高南北低的分布格局。从$\mathrm{WF_{pro}}$的垂直分布来看，$\mathrm{WF_{pro}}$和$\mathrm{OF_a}$的分布及变化主要集中玉门市、瓜州县以及敦煌市。由于当地农业政策的倾斜、制种水平的提高、农用机械的改进与升级以及节水灌溉技术的推广等多重因素，使得流域单位面积作物产量由2000年的$3.16\ \mathrm{t\cdot hm^{-2}}$增加到2020年的$4.32\ \mathrm{t\cdot hm^{-2}}$。

研究期间疏勒河流域$\mathrm{WF_{pro}}$与$\mathrm{WF_{blue}}$的变化波动趋势基本保持一致，且变化幅度较大，其中$\mathrm{WF_{blue}}$占

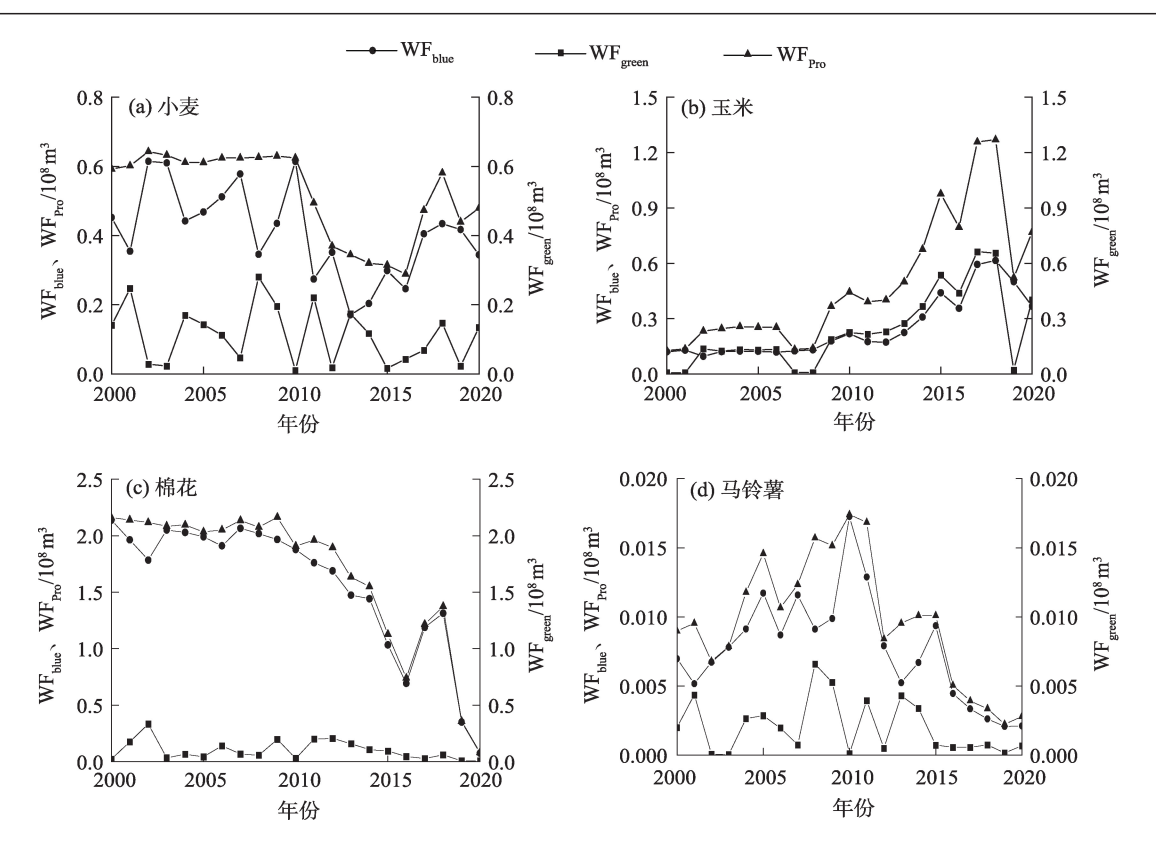


图3 疏勒河流域不同作物生产水足迹变化趋势

Fig. 3 Variation trend of productive water footprint of different crops in the Shule River Basin

比超过90%，居于主导地位。疏勒河流域早期空间错位严重，水资源利用效率低下的OF_a主要分布在肃北县、阿克塞县一带，与之相反的是高效利用水资源的OF_a则主要分布在流域中部地区，随着节水灌溉技术的推广，蓝水资源在疏勒河流域作物安全生产格局中处于主导地位。与以雨养农业为主的地区相比，疏勒河流域的绿水资源生产效率极低，受区域地形、气候等自然条件的制约，WF_{green}对OF_a变化的影响有限。

如图5所示，疏勒河流域中部地区地势平缓、水热条件良好、人口密度高且农业发展相较于位于南部祁连山区和北部马鬃山一带的肃北县和阿克塞县更为发达，对农业水资源的消耗更大，是WF_{pro}和OF_a开发的主要地区；而肃北县和阿克塞县受地形限制，农业自然发展条件较差，农业基础薄弱，肃北县和阿克塞县的年际WF_{pro}和OF_a虽有所增加，但由于贡献度不高，对全流域的影响作用不大。

3.2 作物生产水足迹和区域作物种植面积的时空匹配特征分析

疏勒河流域的基尼系数介于0.13~0.14，空间错配指数介于0~4，表明2000—2020年疏勒河流域作物生产水足迹和作物种植面积的匹配程度较高，资源配置相对比较合理(图6)。研究期间，$G(WF_{pro}-OF_a)$呈缓慢上升后缓慢下降趋势，由0.13上涨至0.14，基本保持不变，相较于呈波动式缓慢下降的$G(WF_{blue}-OF_a)$、$G(WF_{green}-OF_a)$波动下降趋势更为明显，WF_{green}与OF_a的匹配关系较差；且相较于波动较大的$SMI(WF_{green}-OF_a)$，$SMI(WF_{pro}-OF_a)$与$SMI(WF_{blue}-OF_a)$的时空变化趋势波动更为平缓，二者在研究期末与研究期初相差均不大于0.1，表明相较于WF_{blue}，流域WF_{green}与OF_a的匹配关系更差。基尼系数模型与空间错配模型测算结果均表明，疏勒河流域水土资源的匹配在一定程度上是均衡的。总体而言，研究期间疏勒河流域WF_{blue}与OF_a的空间错配逐渐得到缓解，而WF_{green}与OF_a的空间错配情况尚未得到明显改善。

通过评估研究区WF_{pro}和OF_a的时空差异性结果发现，疏勒河流域$SMI(WF_{pro}-OF_a)$总体较低，除个别年份外，整体呈波动式下降趋势，充分说明研究区各地区的WF_{pro}和OF_a具有良好的一致性。而WF_{green}和OF_a的错配程度远高于WF_{blue}，表明OF_a与WF_{blue}变化的相关性比WF_{green}强。与此同时，SMI和G的变化趋势也表明，随着科学技术的进步，疏勒河流域中

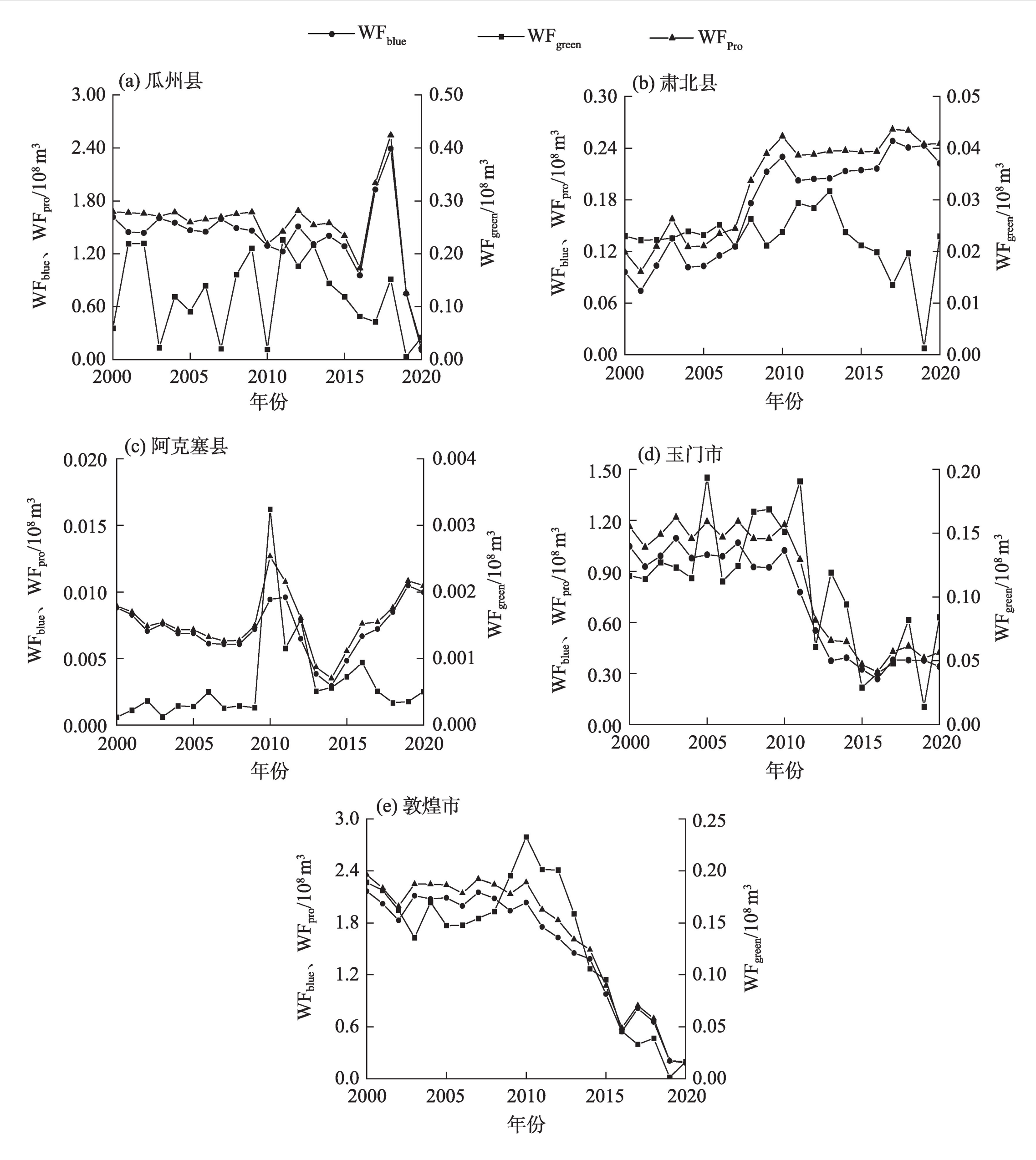


图4　疏勒河流域区域作物生产水足迹变化趋势

Fig. 4　Variation trend of crop production water footprint by various areas in the Shule River Basin

蓝、绿水的利用效率逐渐提高，WF_{pro}和OF_a的空间错配得到了纠正，区域OF_a得到有效利用，这对于区域农业生产活动来说非常友好。

研究将SMI定分为3个水平：0<SMI≤1表示作物种植面积与作物生产水足迹的空间错配程度低；1<SMI≤2表示空间错配程度中等；SMI>2则表示空间错配程度较高。从疏勒河流域各地区空间错配指数时空格局可看出，疏勒河流域各地区作物种植面积与作物生产水足迹的空间错配程度得到了不同程度的改善，研究结果与基尼系数测算结果相一致（图7）。

3.3　作物生产水足迹和区域作物种植面积的敏感性分析

研究计算了疏勒河流域各地区作物种植面积对作物生产水足迹的敏感程度情况，参考相关文献[7]并结合当地情况，将SI划分为4个等级：0<SI≤0.5表示不敏感；0.5<SI≤1.0表示低敏感性；1.0<SI≤1.5表示中度敏感性；SI>1.5则表示高度敏感性。

在研究期间，OF_a对WF_{blue}具有中度和高度敏感性的地区数量先减少后增加，而不敏感和低敏感性的地区数量先增加后减少，整体表现为研究区OF_a对WF_{blue}的响应逐渐呈现出中部高四周低的趋势

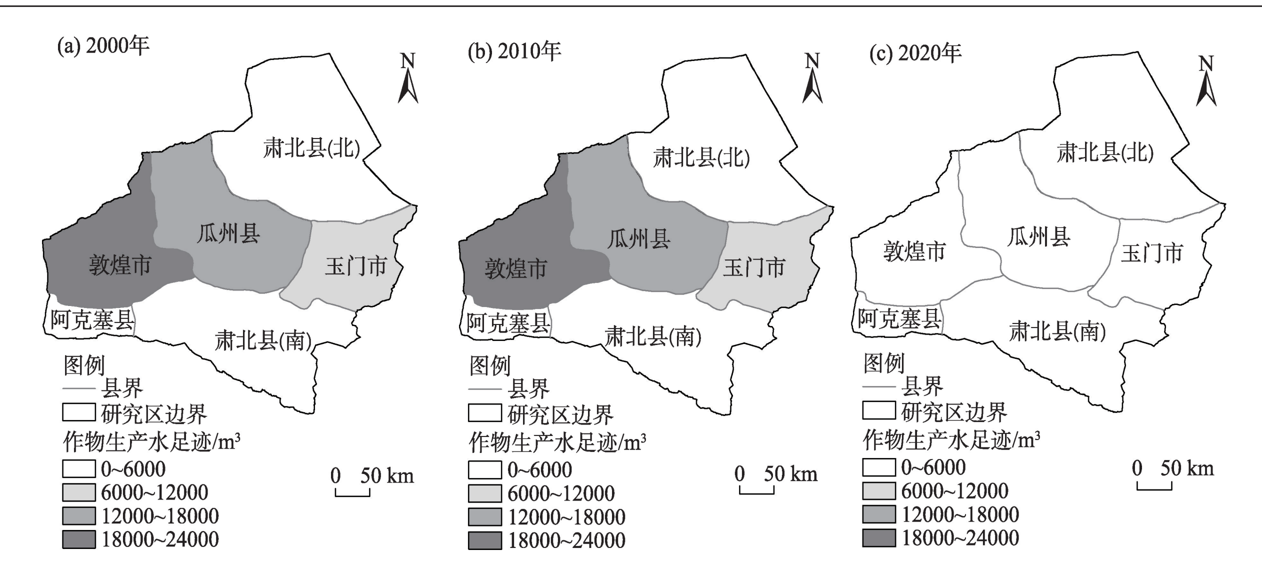
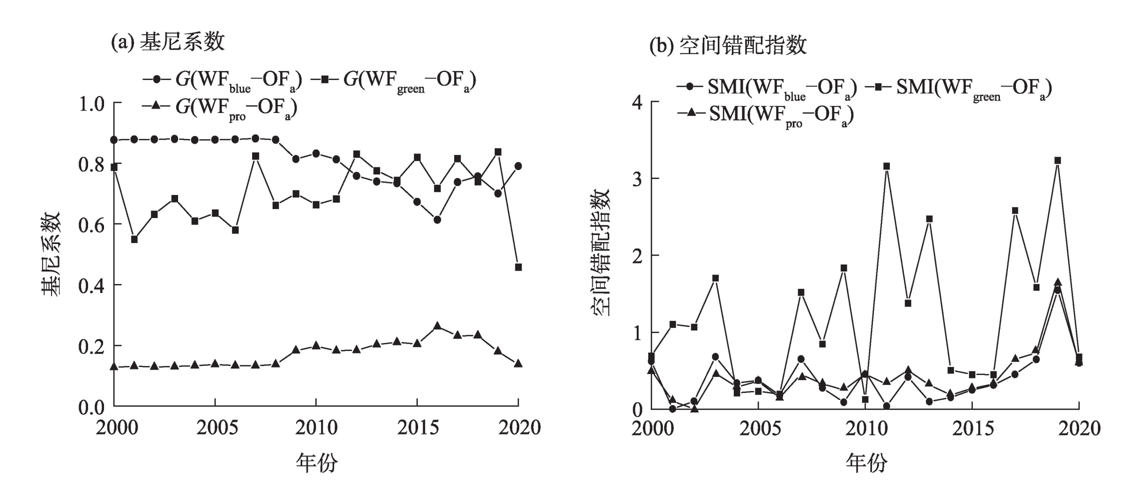


图5 疏勒河流域作物生产水足迹空间分布

Fig. 5 Spatial distributions of crop production water footprint in the Shule River Basin



注：$G(WF_{blue}-OF_a)$为WF_{blue}与OF_a的基尼系数；$G(WF_{green}-OF_a)$为WF_{green}与OF_a的基尼系数；$G(WF_{pro}-OF_a)$为WF_{pro}与OF_a的基尼系数；$SMI(WF_{blue}-OF_a)$为WF_{blue}与OF_a的空间错配指数；$SMI(WF_{green}-OF_a)$为WF_{green}与OF_a的空间错配指数；$SMI(WF_{pro}-OF_a)$为WF_{pro}与OF_a的空间错配指数。下同。

图6 作物生产水足迹与作物种植面积的基尼系数和空间错配指数

Fig. 6 Gini coefficient and spatial mismatch index of crop production water footprint and crop acreage

(图8)。2000—2005年肃北县和阿克塞县具有中度和高度敏感性。2005—2010年肃北县、敦煌市的OF_a对WF_{blue}变化都不敏感，2010—2020年流域各地区的OF_a对WF_{blue}变化都十分敏感。此外，在研究期间，没有任何地区OF_a对流域的WF_{green}变化保持高度敏感，且在2000—2005年和2005—2010年仅有肃北县一个高度敏感区。2015—2020年高度敏感区的数量上升到2个。在其他时期，所有地区的OF_a主要是对WF_{green}变化呈不敏感或低敏感性。

从空间分布看，OF_a对WF_{blue}中度和高度敏感的地区逐渐由中部向四周扩展。特别是2015—2020年，位于流域中部的瓜州县、玉门市和肃北县的OF_a对WF_{blue}变化的敏感性明显高于其他地区，而OF_a对WF_{green}变化的敏感性相对不明显。

研究表明2010以后，疏勒河流域OF_a对WF_{blue}和WF_{green}的响应程度明显提高，且与初期相比差异明显。可能原因是肃北县海拔高且有冰川积雪，水源涵养量较高，而该地区人口较少，农业不发达，因此该地区OF_a对WF_{green}变化的敏感程度远高于其他地区；而位于流域中、下游地区人口密度大、农业发展较好，OF_a对WF_{blue}的敏感程度在科技的发展、农业设施水平的提高等因素作用下逐渐提高。此外，研

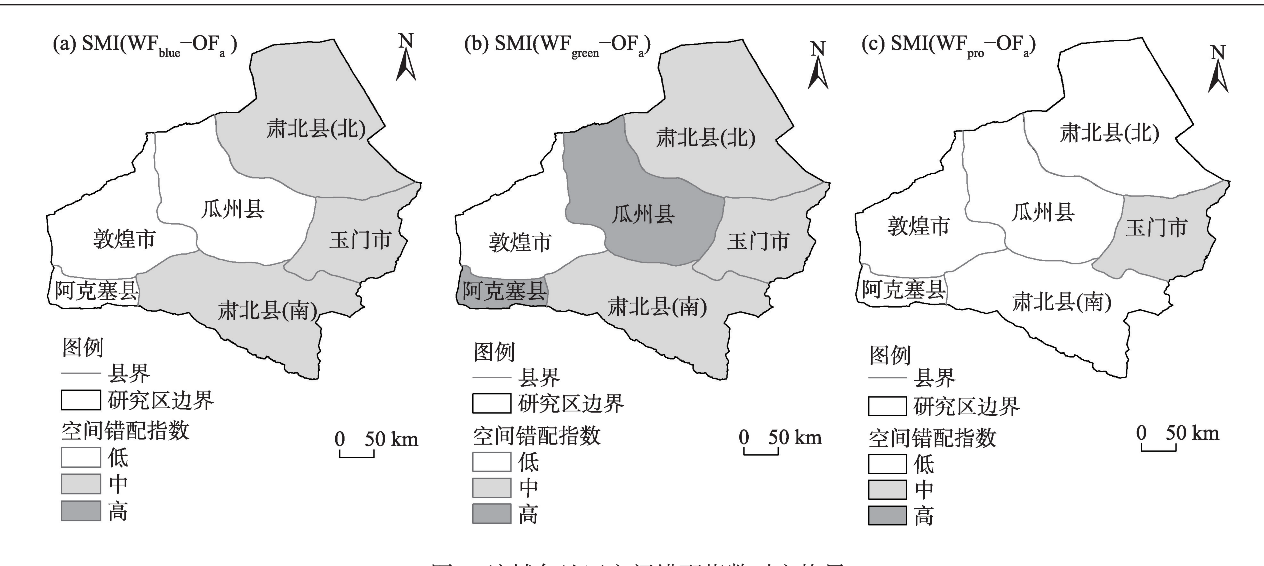


图7 流域各地区空间错配指数时空格局

Fig. 7 Spatial and temporal patterns of spatial mismatch index in the Shule River Basin

(a) 2000—2005年$SI(WF_{blue}-OF_{a})$ (b) 2005—2010年$SI(WF_{blue}-OF_{a})$ (c) 2010—2015年$SI(WF_{blue}-OF_{a})$ (d) 2015—2020年$SI(WF_{blue}-OF_{a})$

(e) 2000—2005年$SI(WF_{green}-OF_{a})$ (f) 2005—2010年$SI(WF_{green}-OF_{a})$ (g) 2010—2015年$SI(WF_{green}-OF_{a})$ (h) 2015—2020年$SI(WF_{green}-OF_{a})$

N
肃北县(北)
瓜州县
敦煌市
玉门市
阿克塞县
肃北县(南)
图例
县界
研究区边界
空间敏感程度
不敏感
低度敏感
中度敏感
高度敏感
0 50 km

注：$SI(WF_{blue}-OF_{a})$为OF_{a}对WF_{blue}的空间敏感程度；$SI(WF_{green}-OF_{a})$为OF_{a}对WF_{green}的空间敏感程度。

图8 疏勒河流域作物生产水足迹与作物种植面积的空间敏感程度分析

Fig. 8 Spatial and temporal sensitivity analysis of crop production water footprint and crop acreage in the Shule River Basin

究区地处河西走廊气候干旱区，需要足够的蓝水才能满足地区农作物的生长，但碍于灌溉水的有效利用程度不高且需用量较大，因此OF_a对疏勒河流域中WF_{blue}变化的敏感程度较WF_{green}而言更高。

4 讨论

疏勒河流域地区属于典型内陆干旱荒漠性气候，水资源极其稀缺。流域年均WF_{pro}约为4.21×10^8 m^3，其中WF_{blue}和WF_{green}占比分别为90.9%和9.1%，与前人[28-30]对河西走廊地区农作物水足迹时空特征研究结论基本一致，这表明流域农作物种植受气候的影响，高度依赖于灌溉水的作用，水资源是限制流域农业发展的重要因素；与国内其他流域的水足迹研究结果[31-32]比较发现区域农业严重依赖蓝水资源有效补给，而绿水资源受区域自然条件限制，对区域农业生产经营活动影响有限。因此通过发展高效农业节水灌溉、作物轮作和休耕等农田经营模式，有利于提高当地农业蓝绿水的利用效率。

在未来发展中，应更加关注农业生产与生态恢复之间的关系，提高水资源和土地资源的综合管理水平。落实“以水定城、以水定地、以水定人、以水定产”的方针，合理利用和开发土地，积极推动耕地整治，在满足农业发展的同时，避免过度开发水资源造成土地退化等危及区域生态安全，维持水资源承载力，实现水资源可持续利用。减轻作物水足迹带来的水资源压力，鼓励农民增加对低耗水作物的种植，并为其提供或增加补贴，继而实现疏勒河流域绿色农业的可持续发展，在提高作物水足迹利用效率和合理安排作物种植面积之间实现双赢。在今后的农业发展中，应当加强对绿水的高效利用，提高节水灌溉技术，从而促进区域绿色生态农业和节水农业的发展。目前绿水的有效管理只能利用虚拟水的贸易实现[33]。研究还发现研究区作物种植面积主要受经济驱动的作用，当地居民早期倾向于种植粮食作物，后期粮食作物种植比例减少，经济作物的比例逐渐增加，以保持收入和生活水平更稳定。

农业水土资源的匹配程度直接关系到粮食产能与水土资源的利用效率，其主要取决于耕地数量和水资源的利用结构等因素，进一步可将其归纳为资源性缺水和工程性缺水，疏勒河流域则两者兼具。本文重点讨论了疏勒河流域水资源和耕地资源之间时空匹配特征，没有考虑到畜牧业的情况，下一步研究需进一步考虑畜牧业的影响，同时还需从更加全面的角度，从流域整体上考虑不同生态类型的综合水土资源时空匹配特征，为流域可持续发展战略提供更坚持的科学支撑。另外在微观尺度下研究疏勒河流域主要作物全生育周期农业水土资源匹配关系，且在考虑土地产能水分敏感度的基础上，更加科学细致地定量分析疏勒河流域农业水土资源匹配综合指数。

5 结论

（1）疏勒河流域水土资源年际变化波动较大，呈“V”型变化波动的态势，其中2009、2016、2019年为主要转折点，疏勒河流域农业水土资源发展水平有了不同程度的改善或者恶化。其中蓝水足迹贡献率为90.9%，与绿水足迹呈互补状态，表明疏勒河流域农业生产受到蓝水足迹的主要约束。WF_{pro}和OF_a的空间聚集性在流域低海拔中部平原地区表现尤为明显。

（2）疏勒河流域WF_{pro}与OF_a的基尼系数与空间错配指数持续下降，表明随着区域农田利用效率提高，区域水土足迹匹配程度提高，空间错配情况得以改善；与WF_{green}相比，WF_{blue}在疏勒河流域的农业水土资源时空匹配情况更为明显。

（3）2000—2020年疏勒河流域，OF_a对WF_{pro}的响应程度越来越大，流域内各地区对WF_{blue}和WF_{green}的敏感程度不断增加，且集聚效应在2010年以后更为明显。

参考文献(References)

[1] Hogeboom R J. The water footprint concept and water's grand environmental challenges[J]. One Earth, 2020, 2(3): 218-222.

[2] Liu C, Jiang W L, Wu Y F, et al. Estimation of regional farmland irrigation water requirements and water balance in northeast China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(47): 71840-71856.

[3] Lu Q, Liu F J, Li Y J, et al. Study on the relationship between water resources utilization and economic growth in Tarim River Basin from the perspective of water footprint[J]. Water, 2022, 14(10): 1655, doi: 10.3390/W14101655.

[4] Mekonnen M, Hoekstra A Y. Sustainability of the blue water footprint of crops[J]. Advances in Water Resources, 2020, 143: 103679, doi: 10.1016/j.advwatres.2020.103679.

[5] Fu Q, Wang S, Li T, et al. Temporal-spatial distribution characteristics and influencing factors of regional agricultural water requirement indicators[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2019, 145(9): 04019019, doi: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.000407.

[6] Hoekstra A Y. Water footprint assessment: Evolvement of a new research field[J]. Water Resources Management, 2017, 31(10): 3061-3081.

[7] Long A, Yu J, Deng X, et al. Understanding the spatial-temporal changes of oasis farmland in the Tarim River Basin from the perspective of agricultural water footprint[J]. Water, 2021, 13(5): 696, doi: 10.3390/W13050696.

[8] Xu X, Yang Z Y. Does aquatic products trade waste or save water resources? An analysis of virtual water trade[J]. Water Policy, 2022, 24(2): 305, doi: 10.2166/WP.2022.156.

[9] 马静, 汪党献, Hoekstra A Y, 等. 虚拟水贸易在我国粮食安全问题中的应用[J]. 水科学进展, 2006, 17(1): 102-107. [Ma Jing, Wang Dangxian, Hoekstra A Y, et al. Application of the virtual water trade to China's grain security[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(1): 102-107.]

[10] Chapagain A K, Hoekstra A Y. Virtual water flows between nations in relation to trade in livestock and livestock products[M]. Delft, The Netherlands: UNESCO-IHE, 2003.

[11] Pacetti T, Castelli G, Schroder B, et al. Water ecosystem services footprint of agricultural production in Central Italy[J]. Science of the Total Environment, 2021, 797: 149095, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149095.

[12] Keys P W, Falkenmark M. Green water and African sustainability[J]. Food Security, 2018, 10(3): 537-548.

[13] Liu D, Liu C, Fu Q, et al. Construction and application of a refined index for measuring the regional matching characteristics between water and land resources[J]. Ecological Indicators, 2018, 91: 203-211.

[14] Veettil A V, Mishra A K. Water security assessment using blue and green water footprint concepts[J]. Journal of Hydrology, 2016, 542: 589-602.

[15] Khan T, Nouti H, Booij M J, et al. Water footprint, blue water scarcity, and economic water productivity of irrigated crops in Peshawar Basin, Pakistan[J]. Water, 2021, 13(9): 1249, doi: 10.3390/w13091249.

[16] 马驰, 杨中文, 宋进喜, 等. 1992—2017年中亚五国农作物水足迹变化特征[J]. 中国生态农业学报, 2021, 29(2): 269-279. [Ma Chi, Yang Zhongwen, Song Jinxi, et al. Characteristics of crop water footprint changes in five Central Asian countries from 1992 to 2017[J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2021, 29(2): 269-279.]

[17] Wisam W Z, Abed S A, Ewaid S H. The agricultural water footprint of Al-Qadisiyah governorate, southern Iraq[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022, 1029(1): 012025, doi: 10.1088/1755-1315/1029/1/012025.

[18] Yuan Z, Xu J J, Meng X Y, et al. Impact of climate variability on blue and green water flows in the Erhai Lake Basin of southwest China[J]. Water, 2019, 11(3): 424, doi: 10.3390/w11030424.

[19] Xue X, Liao J, Hsing Y, et al. Policies, land use, and water resource management in an arid oasis ecosystem[J]. Environmental Management, 2015, 55(5): 1036-1051.

[20] Zhang Y, Zhou Q, Wu F. Virtual water flows at the county level in the Heihe River Basin, China[J]. Water, 2017, 9(9): 687, doi: 10.3390/w9090687.

[21] 王毓芳, 赵成章, 曾红霞, 等. 疏勒河中游湿地景观时空演变及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2022, 39(1): 282-291. [Wang Yufang, Zhao Chengzhang, Zeng Hongxia, et al. Spatial-temporal evolution of wetland landscape patterns and its influencing factors in the middle reaches of the Shule River[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(1): 282-291.]

[22] 俄有浩, 霍治国, 马玉平, 等. 中国北方春小麦生育期变化的区域差异性与气候适应性[J]. 生态学报, 2013, 33(19): 6295-6302. [E Youhao, Huo Zhiguo, Ma Yuping, et al. The regional diversity of changes in growing duration of spring wheat and its correlation with climatic adaptation in northern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(19): 6295-6302.]

[23] 张璇, 孙建船, 杨涛, 等. 甘肃省河西走廊棉花产业现状及可持续发展策略[J]. 中国棉花, 2018, 45(8): 1-3, 8. [Zhang Xuan, Sun Jianchuan, Yang Tao, et al. Current situation and sustainable development of cotton industry in Hexi Corridor of Gansu Province[J]. China Cotton, 2018, 45(8): 1-3, 8.]

[24] Lopez-urrea R, De santa olalla F M, Fabeiro C, et al. An evaluation of two hourly reference evapotranspiration equations for semiarid conditions[J]. Agricultural Water Management, 2006, 86(3): 277-282.

[25] Gini C. Measurement of inequality of incomes[J]. The Economic Journal, 1921, 31(121): 124-126.

[26] Gobillon L, Selod H, Zenou Y. The mechanisms of spatial mismatch[J]. Urban studies, 2007, 44(12): 2401-2427.

[27] Du J, Yang Z, Wang H, et al. Spatial-temporal matching characteristics between agricultural water and land resources in Ningxia, northwest China[J]. Water, 2019, 11(7): 1460, doi: 10.3390/w11071460.

[28] 蔡振华, 沈来新, 刘俊国, 等. 基于投入产出方法的甘肃省水足迹及虚拟水贸易研究[J]. 生态学报, 2012, 32(20): 6481-6488. [Cai Zhenhua, Shen Laixin, Liu Junguo, et al. Applying input-output analysis method for calculation of water footprint and virtual water trade in Gansu Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(20): 6481-6488.]

[29] 周凡, 周冬梅, 金银丽, 等. 疏勒河流域生态系统服务供需空间匹配特征[J]. 干旱区地理, 2023, 46(3): 471-480. [Zhou Fan, Zhou Dongmei, Jin Yinli, et al. Spatial matching characteristics of supply and demand of ecosystem services in the Shule River Basin[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(3): 471-480.]

[30] 孙丽蓉, 周冬梅, 岑国璋, 等. 基于地理探测器模型的疏勒河流域景观生态风险评价及驱动因素分析[J]. 干旱区地理, 2021, 44(5): 1384-1395. [Sun Lirong, Zhou Dongmei, Cen Guozhang, et al. Landscape ecological risk assessment and driving factors of the Shule River Basin based on the geographic detector model[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(5): 1384-1395.]

[31] 阿不都艾尼·阿不力孜, 任强, 王义成, 等. 塔里木河流域绿洲水土资源匹配特征及稳定性分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2022, 20(1): 71-78. [Abulizi Abuduaini, Ren Qiang, Wang Yicheng, et al. Analysis on the matching characteristics and stability of oasis water and land resources in the Tarim River Basin[J]. Journal of China Water Resources and Hydropower Research, 2022, 20(1): 71-78.]

[32] 张莹, 雷国平, 张弘强, 等. 三江平原典型流域耕地利用水土资源匹配时空演变——以挠力河流域为例[J]. 中国农业资源与区划, 2022, 43(7): 49-59. [Zhang Ying, Lei Guoping, Zhang Hongqiang, et al. Spatiotemporal dynamics of land and water resources matching of cultivated land in typical basin of Sanjiang Plain: A case study of Naoli River Basin[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2022, 43(7): 49-59.]

[33] 曾贤刚, 段存儒, 王睿. 中国农产品贸易虚拟水转移及其影响因素研究[J]. 中国环境科学, 2021, 41(2): 983-992. [Zeng Xiangang, Duan Cunru, Wang Rui. Virtual water transfer in Chinese agricultural products trade and its determinants[J]. China Environmental Science, 2021, 41(2): 983-992.]

Spatial and temporal matching characteristics of agricultural land and water resources in the Shule River Basin

YANG Jing[1], ZHOU Dongmei[1], MA Jing[1], ZHU Xiaoyan[1], JIN Yinli[1], ZHOU Fan[2], ZHANG Jun[1,3]

(1. College of Resources and Environment, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China; 2. College of Management, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China; 3. Research Center for Water-saving Agriculture in Gansu Province, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: As important resources for agricultural production, the effective spatial allocation of land and water resources is conducive to the full utilization of resources and sustainable regional development. In this study, we selected the Shule River Basin, northwest China as the research object. On the basis of the water footprint theory to account for the changes in the water footprint of agricultural production in the Shule River Basin, the Gini coefficient and the spatial mismatch model were used to quantitatively assess the dynamic trends of the spatial and temporal matching of agricultural land and water resources in the study area during 2000—2020 and their sensitivity. Our results showed the following: (1) The agricultural water footprint and crop planting area in the Shule River Basin showed a decreasing trend during 2000—2020. The peak of crop production water footprint appeared in 2007 and 2018, and the peak of crop planting area appeared in 2009 and 2018. The annual contribution rate of blue water footprint is 90.9%, which is complementary to green water footprint, indicating that blue water is the main source of agricultural water in the Shule River Basin. (2) The spatial matching degree of agricultural water and soil resources is gradually improved, and it is generally in a better matching state. The spatial mismatch between blue and green water footprint and crop planting area was gradually improved, and the spatial distribution showed the characteristics of high in the middle and low in the periphery. (3) The number of areas with moderate or high sensitivity to crop production footprint was increasing.

Key words: water footprint; land and water matching; sensitivity analysis; Shule River Basin